



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Patentschrift
10 DE 40 11 780 C 1

51 Int. Cl. 5:
G 01 B 11/24
G 01 B 11/03

21 Aktenzeichen: P 40 11 780.4-52
22 Anmeldetag: 11. 4. 90
43 Offenlegungstag: —
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 26. 9. 91

DE 40 11 780 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:
Langer, Hans, Dr., 8032 Gräfelfing, DE

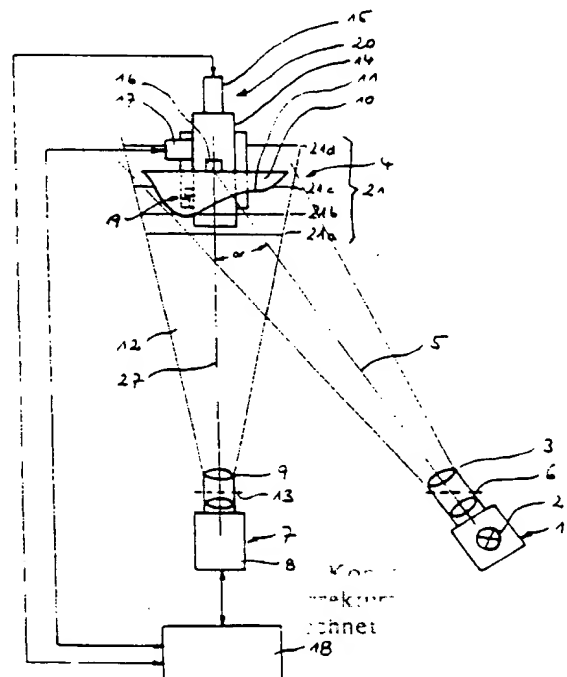
72 Erfinder:
gleich Patentinhaber

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE	38 17 559 C1
DE	38 13 692 A1
DE	37 21 247 A1
DE	35 27 074 A1
DE	33 28 753 A1
DE	24 10 947 A1
EP	01 21 353 A1

54 Verfahren und Vorrichtung zur Abtastung von Oberflächen

57 Bei einem Verfahren zur Abtastung einer Oberfläche, bei dem auf die Oberfläche mittels einer Vorrichtung (1, 6) ein erstes Modulationsmuster projiziert wird, die Oberfläche (11) mit einer Betrachtungsvorrichtung (7) über ein zweites Modulationsmuster (13) unter einem Winkel zur Projektionsrichtung betrachtet und aus dem sich durch die Überlagerung der beiden Modulationsmuster ergebenden Linienmuster Koordinaten der Oberfläche bestimmt werden, tritt das Problem auf, daß eine genaue Bestimmung der Koordinaten aufgrund von Abbildungsfehlern unmöglich ist. Dieses Problem wird durch eine Eichung gelöst, bei der eine Referenzfläche mit zumindest einem bekannten Koordinatenpunkt an einer Mehrzahl von Eichstellen entlang der Projektions- bzw. Betrachtungsrichtung (5, 27) ausgewertet wird.



DE 40 11 780 C 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Abtastung einer Oberfläche nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1. Die Erfindung betrifft ferner eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens nach dem Oberbegriff des Anspruchs 14.

Ein derartiges Verfahren sowie eine derartige Vorrichtung sind aus der DE-OS 33 28 753 bzw. der DE-OS 37 21 247 bekannt. Hierbei wird auf das abzutastende Objekt ein erstes Modulationsmuster beispielsweise in Form eines feinen Liniengitters projiziert, das auf ein zweites Modulationsmuster, beispielsweise ein Referenzgitter, abgebildet wird. Die Überlagerung der beiden Muster bzw. Gitter ergibt ein Streifenbild (Moire-Muster bzw. Moire-Linien). Die Intensitätsverteilung der Streifenbilder enthält Informationen über die räumliche Struktur bzw. die Oberfläche des Objekts. Aus diesen Informationen können mittels eines geeigneten Verfahrens, beispielsweise des Phasen-Shift-Verfahrens, die Koordinaten der abgetasteten Oberfläche bestimmt werden, indem eine Mehrzahl von phasenverschobenen Streifenbildern, beispielsweise drei, ausgewertet und miteinander verrechnet werden.

Bei der Auswertung bzw. Berechnung der Oberflächenkoordinaten treten jedoch erhebliche praktische Probleme auf. So kann die Z-Koordinate, also die Objektiefe in Richtung der Projektion der Liniengitter, nur relativ und nicht absolut in Bezug auf eine vorgegebene Referenz bestimmt werden; ferner sind die von den Moire-Linien dargestellten Höhenschichtlinien des Objekts nicht äquidistant, da die Beleuchtungs- bzw. Projektionsgeometrie und die Beobachtungsgeometrie üblicherweise divergent ist und damit die Abstände der Moire-Ebenen mit der Entfernung vom Projektor bzw. von der Kamera zunehmen; die divergente Geometrie führt auch zu einer Tiefenabhängigkeit des lateralen oder seitlichen Abbildungsmaßstabes; schließlich kann die relative Tiefe verschiedener Objektpunkte nur dann ermittelt werden, wenn die relative "Ordnungsdifferenz" der entsprechenden Moire-Linien aus dem aufgenommenen Bild entnommen werden kann, d. h. wenn festgestellt werden kann, zu welchen Höhenlinien einzelne beobachtete Teile von Moire-Linien gehören, was jedoch bei Unstetigkeiten der Oberfläche beispielsweise infolge von Kanten, bei Abschattungen und großen Gradienten nicht möglich ist.

Aus der DE-OS 38 13 692 ist es bekannt, bei einem ähnlichen Meßverfahren zur Eichung ein Eichziel in Beobachtungsrichtung an festgelegte Eichstellen zu verschieben und dort Korrekturfaktoren für die folgende Objektvermessung zu ermitteln.

Es ist Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zu schaffen, bei dem bzw. bei der eine Korrektur der bei der Objektmessung erhaltenen Oberflächenendaten in einfacher Weise ermöglicht wird.

Dies wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren und eine Vorrichtung mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruchs 1 bzw. des Anspruchs 14 erreicht.

Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

Erfindungsgemäß können die für die quantitative Auswertung erforderlichen Meßdaten dadurch erfaßt werden, daß das Prüfobjekt bzw. ein Eichkörper in einer Richtung senkrecht zu den Moire-Ebenen bewegt werden und die Moire-Muster bei unterschiedlichen Positionen des Prüfobjekts oder Eichkörpers aufgenommen und ausgewertet werden.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird unter Bezugnahme auf die Figuren beschrieben. Von den Figuren zeigt

Fig. 1 eine Draufsicht auf die Vorrichtung in schematischer Darstellung; und

Fig. 2 eine Ansicht einer Ausführungsform der Referenzfläche.

Die in Fig. 1 dargestellte Vorrichtung enthält einen mit einer Lichtquelle 2, z. B. einer Bogenlampe, ausgerüsteten Projektor 1, der über eine Optik 3 ein Meßfeld 4 beleuchtet. Anstelle von Licht kann aber auch jede andere elektromagnetische Strahlung, wie z. B. IR-Strahlung, verwendet werden. Im Strahlengang des Projektors entlang der Projektionsrichtung 5 ist ein Projektionsgitter 6 angeordnet, das vorzugsweise als Strichgitter ausgebildet ist. Aufgrund der Divergenz des Strahlengangs führt das Strichgitter zu einer Projektion räumlich divergierender Strichebenen.

Das Meßfeld 4 wird von einer Bildaufnahmeeinrichtung 7 unter einer Betrachtungsrichtung 27, die einen Winkel α zur Projektionsrichtung 5 einschließt, betrachtet. Die Bildaufnahmeeinrichtung weist eine Kamera 8, vorzugsweise eine Video-, Fernseh- oder CCD-Kamera, sowie eine Betrachtungsoptik 9 auf, mit der eine Scharfstellung auf ein im Meßfeld angeordnetes Objekt 10 mit einer Oberfläche 11 möglich ist. Im Betrachtungsstrahlengang 12 ist ein Referenzgitter 13 angeordnet, das ebenfalls als Strichgitter ausgebildet ist. Die Ebene des Referenzgitters 13 ist vorzugsweise parallel zur Ebene des Projektionsgitters 6 und senkrecht zur Betrachtungsrichtung 27 angeordnet.

Im Meßfeld 4 ist eine Positioniervorrichtung 20 angeordnet, die eine in Betrachtungsrichtung 27 bzw. senkrecht zur Ebene der Gitter 6, 13 verschiebbare Verschiebeeinrichtung 14 beispielsweise in Form eines verschiebbaren Schlittens eines Präzisionstisches aufweist. Am Schlitten ist ein einstellbarer Anschlag 19 zur Festlegung einer Endstellung des Schlittens bzw. der Verschiebeeinrichtung in Betrachtungsrichtung vorgesehen. Die Verschiebeeinrichtung 14 besitzt ferner einen Antrieb 15 in Form eines DC-Motors oder eines Schrittmotors und eine Halterung 16 zur auswechselbaren Fixierung des Objekts 10 derart, daß die abzutastende Oberfläche 11 von der Kamera 8 betrachtet werden kann. Schließlich ist an der Verschiebeeinrichtung eine Meßvorrichtung 17 zur Erfassung der Verschiebeposition in Richtung senkrecht zu den Ebenen der Gitter 6, 13, ausgehend von der durch den Anschlag festgelegten Endstellung, vorgesehen. Die Meßvorrichtung 17 kann eine übliche hochauflösende optisch-elektronische Wegmeßvorrichtung sein, die die erfaßte Position bzw. den Abstand von der durch den Anschlag 19 festgelegten Endstellung in elektronisch verarbeitbare Signale umsetzt.

Die Kamera 8 und die Positioniervorrichtung 20 bzw. der Antrieb 15 und die Meßvorrichtung 17 derselben sind jeweils mit einer Steuer- und Auswertevorrichtung 18 verbunden, die so ausgebildet ist, daß sie die im folgenden beschriebenen Operationen ausführen kann, und die dazu erforderlichen Bauteile wie Rechner, Speicher, Treiber etc. aufweist. Ein Beispiel für eine derartige Steuer- und Auswerteeinheit ist aus der DE-OS 33 28 753 bekannt.

Im Betrieb ergibt sich durch die Überlagerung der beiden Gitter 6, 13 ein räumliches Moire-Muster, das bei der gewählten parallelen Anordnung beider Gitter die einfache Form von annähernd parallel zur Gitterebene liegenden Moire-Flächen 21 annimmt. Aufgrund der Di-

vergenz des Projektionsstrahlengangs und des Betrachtungsstrahlengangs nehmen dabei die Abstände zwischen den Moire-Flächen mit zunehmender Entfernung von den Gittern (d. h. höherer Moire-Ordnung) zu. Aufgrund der unvermeidlichen Abbildungsfehler der Optiken 3, 9 sind die Moire-Flächen auch nicht vollständig eben, sondern mehr oder weniger stark gekrümmt.

Zunächst erfolgt die Eichung der Vorrichtung. Hierzu wird auf dem Schlitten der Verschiebeeinrichtung 14 ein Eichkörper 22 beispielsweise in Form einer in Fig. 2 dargestellten ebenen Platte 23 so befestigt, daß sich die der Bildaufnahmeeinrichtung 7 zugewandte Oberfläche, die eine Referenzfläche 24 für die Eichung darstellt, parallel zu den Moire-Ebenen bzw. zu den Ebenen der Gitter 6, 13 erstreckt. Die Größe der Platte entspricht etwa der Größe der abzutastenden Oberfläche 11. Auf der Platte ist ein Raster 25 mit einer über die Oberfläche der Platte verteilten Anzahl von Rasterpunkten 26 aufgebracht, deren Koordinaten bezüglich des Plattenmittelpunkts 28, der auf der optischen Achse des Betrachtungsstrahlengangs 12 liegt, bekannt sind.

Die Platte 23 wird daraufhin mittels der Verschiebeeinrichtung 14 soweit in Richtung zur Bildaufnahmeeinrichtung 7 hin verschoben, daß die Referenzfläche 24 im Plattenmittelpunkt 28 in der ersten relevanten Moire-Ebene 21a liegt. Dies kann dadurch festgestellt werden, daß an dieser Stelle der von der Kamera 8 registrierte Grauwert maximal ist. Diese Position der Referenzfläche 24 dient als Referenzposition. Der Anschlag 19 wird auf diese Stellung der Verschiebeeinrichtung 14 eingestellt und die Meßvorrichtung 17 wird auf Null gestellt.

Aufgrund der Krümmung der Moire-Flächen liegt der maximale Grauwert in dieser Position zwar am Plattenmittelpunkt 28, nicht aber in der gesamten Referenzfläche 24 vor. Die Bildaufnahmeeinrichtung 7 tastet nun die Referenzfläche 24 ab, mißt den Grauwert an jedem Rasterpunkt 26 und liefert ein entsprechendes Signal an die Steuer- und Auswertevorrichtung 18. Diese berechnet aus den geometrischen und optischen Parametern der Anordnung einen theoretischen Wert, vergleicht diesen theoretischen Wert mit dem an jedem Rasterpunkt 26 gemessenen tatsächlichen Wert und bestimmt aus diesem Vergleich eine Matrix von Korrekturwerten für diese erste Position der Referenzfläche 24.

Die Steuer- und Auswertevorrichtung 18 betätigt daraufhin den Antrieb 15 derart, daß die Verschiebeeinrichtung 14 die Referenzfläche 24 von der Bildaufnahmeeinrichtung 7 weg in Richtung der die Z-Koordinate darstellenden Betrachtungsrichtung 27 soweit verschiebt, bis wiederum im Plattenmittelpunkt 28 ein maximaler Grauwert festgestellt wird. Dies bedeutet, daß der Plattenmittelpunkt in der Ebene der nächsten Moire-Fläche liegt. Der Verschiebeweg vom Anschlag bis zu dieser Position wird von der Meßvorrichtung 17 gemessen und als Z-Koordinate an die Steuer- und Auswertevorrichtung 18 übermittelt. Wiederum erfolgt nun eine Grauwertmessung an allen Rasterpunkten 26, ein Vergleich mit theoretischen Werten und die Erstellung einer Korrekturmatrix für diese Z-Koordinate.

Derselbe Vorgang wird nun für jede Moire-Fläche im relevanten Meßfeld 4 durchgeführt. Als Ergebnis liegt in der Steuer- und Auswertevorrichtung eine dreidimensionale Korrekturmatrix vor, die Korrekturwerte für die räumlichen Koordinatenwerte aller Rasterpunkten an allen Meßstellen (z-Koordinate) enthält. Durch Interpolation dieser Korrekturwerte können Eichkurven bzw. Eichflächen errechnet werden.

Nach dieser Eichung wird anstelle des Eichkörpers 22

das zu vermessende Objekt 10 an der Halterung 16 der Verschiebeeinrichtung 14 befestigt. Aufgrund der Krümmung der abzutastenden Oberfläche 11 ist diese von Moire-Linien überlagert, welche Höhenschichtlinien der Objektiefe darstellen. Ein Bild dieser Oberfläche 11 mit überlagertem Linienmuster wird von der Bildaufnahmeeinrichtung 7 aufgenommen, die für jeden der beispielsweise 512×512 Abtastpunkte einen Grauwert an die Steuer- und Auswerteeinheit übermittelt. Durch Zuordnung der festgestellten Höhenschichtlinien zu den bei der Eichung ermittelten Verschiebepositionen (Moire-Flächen) kann nun in der Steuer- und Auswerteeinheit zu jedem der Abtastpunkte aus der Korrekturmatrix bzw. den Eichkurven oder -flächen ein Korrekturwert berechnet werden. Durch Verknüpfung der für diesen Abtastpunkt aus dem Grauwert nach bekannten Verfahren (z. B. dem Phasen-Shift-Verfahren; vgl. die DE-OS 33 28 753) berechneten theoretischen Position mit diesem Korrekturwert ergibt sich der tatsächliche Koordinatenwert des Abtastpunktes.

Die Korrektur der berechneten Koordinaten der Abtastpunkte kann praktisch auch so durchgeführt werden, daß aus der Matrix der Korrekturwerte jeweils Eichkurven für die Abhängigkeit des Abstandes zweier Moire-Linien bzw. -flächen von der Objektiefe (in Richtung der Z-Koordinate) und für die Abhängigkeit des lateralen Abbildungsmaßstabes (x, y-Koordinaten) von der Objektiefe ermittelt werden und die tatsächliche Objektiefe anhand der ersten Eichkurve berechnet und danach der laterale Abbildungsmaßstab mittels der zweiten Eichkurve korrigiert wird.

Anstelle des separaten Eichkörpers 22 kann auch das zu messende Objekt 10 selbst zur Eichung verwendet werden. Voraussetzung ist dann allerdings, daß die Oberflächenkoordinaten der Oberfläche 11 an einer Vielzahl von Punkten bekannt sind, sodaß ebenfalls die obengenannten Eichkurven bzw. die Korrekturmatrix ermittelt werden können. Ebenso muß als Eichkörper keine Platte verwendet werden, sondern es kann jeder andere Eichkörper mit bekannten Oberflächenkoordinaten eingesetzt werden.

Bei einer anderen Ausführungsform der Erfindung wird die Eichung nicht an den Stellen mit maximalem Grauwert, sondern an denjenigen Stellen, an denen ein mittlerer Grauwert festgestellt wird, durchgeführt. Dies hat den Vorteil, daß aufgrund des stärkeren Gradienten im mittleren Graubereich die Bestimmung der Eichstelle mit größerer Genauigkeit möglich ist. Die nächste Eichstelle wird in gleicher Weise dadurch erhalten, daß die Verschiebeeinrichtung so weit verfahren wird, bis wiederum derselbe vorbestimmte Grauwert wie bei der vorhergehenden Eichstelle festgestellt wird.

Schließlich kann zur Eichung anstelle der Referenzfläche 24 auch die Beleuchtungsvorrichtung (1) zusammen mit der Betrachtungsvorrichtung (7) verschoben werden. Hierzu wird die Oberfläche (11) oder die Referenzfläche ortsfest fixiert und ein die Beleuchtungsvorrichtung (1) und die Betrachtungsvorrichtung (7) enthaltender Meßkopf wird auf der Verschiebeeinrichtung (14) befestigt. Die Verschiebung zu den einzelnen Eichstellen und die Eichung selbst erfolgt dann in gleicher Weise wie beim oben beschriebenen Ausführungsbeispiel.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Abtastung einer Oberfläche, bei dem auf die Oberfläche ein erstes Modulationsmu-



ster projiziert wird, die Oberfläche über ein zweites Modulationsmuster unter einem Winkel zur Projektionsrichtung betrachtet wird und aus dem sich durch die Überlagerung der beiden Modulationsmuster ergebenden Linienmuster Koordinaten der Oberfläche bestimmt werden, dadurch gekennzeichnet, daß vor der Abtastung eine Eichung derart erfolgt, daß eine Referenzfläche mit zumindest einem bekannten Koordinatenpunkt an einer Mehrzahl von Eichstellen entlang der Projektions- bzw. Betrachtungsrichtung ausgewertet wird, daß als Eichstellen diejenigen Stellen gewählt werden, an denen der Wert des Linienmusters jeweils gleich einem vorbestimmten Referenzwert ist, und daß die Koordinaten der abzutastenden Oberfläche durch Vergleich des bei deren Betrachtung ermittelten Wertes des Linienmusters mit dem bei der Eichung ermittelten Wert des Linienmusters bestimmt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein an dem bekannten Koordinatenpunkt ermittelter Wert des Linienmusters in Bezug zu der Koordinate der entsprechenden Eichstelle gesetzt wird.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die für den Koordinatenpunkt an den Eichstellen festgestellten Werte des Linienmusters mit entsprechenden berechneten Werten verglichen und daraus Korrekturwerte für den betreffenden Koordinatenpunkt bestimmt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Koordinaten der abzutastenden Oberfläche durch Verknüpfung des bei deren Betrachtung ermittelten Wertes des Linienmusters mit dem zugehörigen Korrekturwert bestimmt werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Wert des Linienmusters der Grauwert verwendet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß als Referenzwert ein vorbestimmter mittlerer Grauwert verwendet wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das erste und zweite Modulationsmuster jeweils mittels eines Strichgitters erzeugt werden.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß beide Strichgitter in parallelen Ebenen angeordnet sind.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Referenzfläche eine ebene und parallel zu den Ebenen der Strichgitter angeordnete Fläche ist.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Wert des Linienmusters an einer Eichstelle an einer Mehrzahl von über die Referenzfläche verteilten Stellen ausgewertet wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß als Koordinate der Eichstelle die Position der Referenzfläche ausgehend von einem Referenzpunkt in Betrachtungsrichtung verwendet wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Referenzfläche zur Eichung in Betrachtungsrichtung verschoben wird.

13. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet,

daß die Referenzfläche ortsfest ist und die Projektion und die Betrachtung mittels eines Meßkopfes erfolgt, der relativ zur Referenzfläche in Betrachtungsrichtung verschoben wird.

14. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, mit einer Vorrichtung (1) zur Beleuchtung der Oberfläche (11), einer Aufnahmeeinrichtung (7) zur Betrachtung der Oberfläche unter einem Winkel zur Beleuchtungsrichtung, einem ersten Gitter (6) im Beleuchtungsweg und einem zweiten Gitter (13) im Betrachtungsweg sowie einer mit der Aufnahmeeinrichtung (7) verbundenen Steuer- und Auswerteeinrichtung (18), gekennzeichnet durch eine mit der Steuer- und Auswerteeinrichtung (18) verbundene Einrichtung (20) zur Positionierung der Oberfläche (11) oder einer Referenzfläche (24) und der Aufnahmeeinrichtung (7) relativ zueinander an einer Mehrzahl von Positionen mit unterschiedlichem Abstand der Oberfläche (11) oder der Referenzfläche (24) vom ersten (6) bzw. zweiten (13) Gitter sowie durch eine Meßvorrichtung (17) zur Erfassung der Position der Referenzfläche.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Positioniereinrichtung (20) als Verschiebeeinrichtung (14) zum Verschieben der Fläche oder eines der Beleuchtungsvorrichtung (1) und der Aufnahmeeinrichtung (7) enthaltenden Meßkopfes in einer Richtung senkrecht zur Ebene der Gitter (6, 13) ausgebildet ist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Verschiebeeinrichtung (14) einen einstellbaren Anschlag (19) aufweist.

17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Positioniereinrichtung (20) eine Halterung (16) zum auswechselbaren Halten eines Objekts (10) mit der abzutastenden Oberfläche oder eines Eichkörpers (22) mit der Referenzfläche aufweist.

18. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Beleuchtungsvorrichtung (1) als Projektor ausgebildet ist.

19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Aufnahmeeinrichtung (7) als Videokamera ausgebildet ist.

20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Verschiebeeinrichtung (14) die Meßvorrichtung (17) zur Erfassung der Position der abzutastenden Oberfläche (11) bzw. der Referenzfläche (24) oder des Meßkopfes in Bezug auf den Anschlag (19) in Verschieberichtung aufweist.

21. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuer- und Auswerteeinrichtung (18) einen Speicher zur Speicherung der Werte des Linienmusters der Referenzfläche und einen Rechner zur Berechnung der Koordinaten der Oberfläche aufweist.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

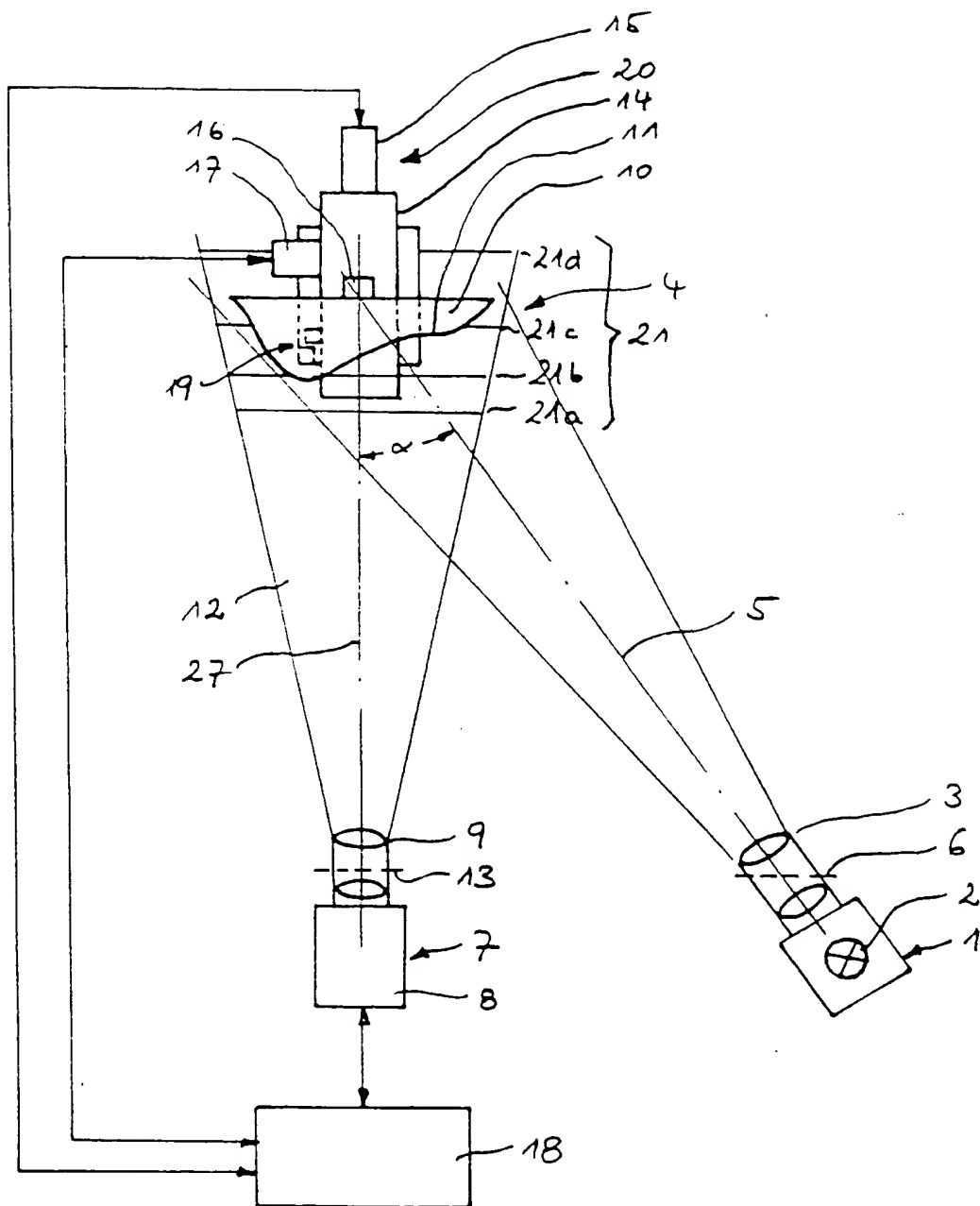


Fig. 1

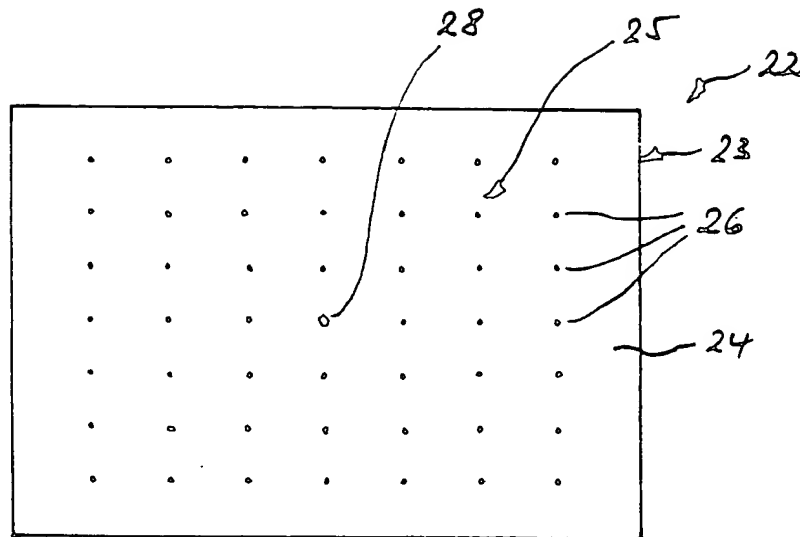


Fig. 2